https://jmme.um.ac.ir/
DOI: 10.22067/jmme.2022.74057.1036

تأثیر انقطاع خطوط لیزر بر ساختار و خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت دار در فرایند حکاکی لیزر*

مقاله پژوهشی

محمدرضا جهانگیری(۱) حسام بیانی(۲) محمد اردستانی(۳)

چکیده در تحقیق حا ضر تاثیر انقطاع خطوط لیزر در حین فرایند حکاکی لیزر در حضور/عدم حضور یک میدان مغناطیسی خارجی بر روی تلفات هسته و ساختار حوزه های مغناطیسی در ورق‌های فولاد سیلیکونی جهتدار بررسی شد. با اعمال الگوهای مختلف انقطاع، تاثیر طول انقطاع، یک طرفه یا دو طرفه اعمال کردن لیزر و نیز همپوشانی یا غیرهمپوشانی خطوط لیزر (برای ورق‌های حکاکی شده دو طرفه) بر روی ساختار دامین ها و تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی ارزیابی شد. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، شرایط بهینه حکاکی لیزر منقطع روی سطح ورق‌ها بدست آمد. نتایج این تحقیق نشان می دهد اگرچه در طول‌های انقطاع کوچک نظیر ۲ میلیمتر، تاثیر فرایند لیزر روی کاهش تلفات ورق‌ها ناچیز است، اما با افزایش طول انقطاع به حدود ٦ میلیمتر، تلفات مغناطیسی ورق‌ها تا حد زیادی بهبود می یابد. با افزایش مجدد طول انقطاع تا حدود ۱۰ میلیمتر، تلفات ورق‌ها دوباره افزایش می یابد و این نشان می دهد که طول انقطاع ٦ میلیمتر، تلفات مغناطیسی بهینه را در ورق‌ها ایجاد می نماید. استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی طولی همراه با تابش لیزر منقطع با الگوی انقطاع بهینه، منتج به کاهش تقریبا ١٦ درصد تلفات هسته در فولادهای سیلیکونی جهتدار می شود.

واژه‌های کلیدی فولاد سیلیکونی جهت دار، حکاکی با لیزر؛ انقطاع لیزر، ساختار دامین؛ تلفات هسته.

مقدمه

مواد مغناطیسی بر اساس مشاهده رفتارشان در میدان مغناطیسی به دسته‌بندی‌های متفاوتی تقسیم می‌شوند. در دقیق‌ترین حالت تقسیم‌بندی رفتار مواد با استفاده از حلقه هیسترزیس به پنج دسته دیامغناطیس، پارامغناطیس، آنتی‌فرومغناطیس، فرومغناطیس و فری‌مغناطیس تقسیم‌بندی می‌شوند [2-1]. در تقسیم‌بندی عمومی‌تری سه دسته اول را به علّت اثر ناچیز در میدان مغناطیسی در شرایط معمول، ماده غیرمغناطیسی و دو دسته باقی‌مانده را ماده مغناطیسی می‌گویند [2].

مواد مغناطیسی بر اساس سهولت مغناطیسی شدن و از دست دادن خاصیت مغناطیسی به دو دسته نرم و سخت تقسیم‌بندی می‌شوند. معمول‌ترین مواد مغناطیسی نرم شامل آلیاژهای آهن، آلیاژهای نیکل، آلیاژهای کبالت و سرامیک‌های نرم هستند [3-1] که در این میان آلیاژهای آهنی با توجه به خواص مغناطیسی مناسب و قیمت پایین، پرمصرف‌ترین آن‌ها است. در میان انواع مختلف مواد مغناطیسی نرم، فولادهای الکتریکی سیلیکونی، پرمصرف‌ترین و در عین حال ارزان‌ترین آن‌ها هستند. این نوع فولادها عموماً به‌صورت ورق‌های نازکی تولید می‌شوند که وظیفه انتقال شار مغناطیسی را در تجهیزات الکتریکی نظیر ترانسفورماتورها و الکتروموتورها به صورت مناسب و همراه با حداکثر راندمان برعهده دارند [6-4].

در میان ورق های فولادی سیلیکونی، ورق‌های با دانه های جهتدار مطلوبترین خواص مغناطیسی را (در جهت نورد) ارائه می دهند. این ورق ها عمدتاً ۳/۳-۳ درصد وزنی سیلیسیم دارند و در ضخامت های بین ۰/۳۵-۰/۲۳ میلی متر تولید می شوند [7]. برای کاهش تلفات هسته در این ورق های جهتدار در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده ای انجام شده و روش‌های مختلفی توسعه یافته است که یکی از مهمترین آنها اصلاح دامین‌های (حوزه های) مغناطیسی از طریق اعمال تنش‌های کششی روی سطح ورق‌هاست [10-8]. تنش‌های کششی می توانند بصورت یکنواخت و از طریق اعمال پوشش‌های مناسب روی سطح ورق‌ها بدست آیند [11,12]. روش دیگر، ایجاد

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۱٦ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/٤/۱۳ می‌باشد.
(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه پژوهشی متالورژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.
Email: mjahangiri@nri.ac.ir
(۲) کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانش آموخته واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
(۳) استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تنش‌های کششی موضعی است که بطور عمده با فرایندهایی نظیر ایجاد خراش‌های مکانیکی یا حکاکی لیزر روی سطح ورق‌ها حاصل می شود [10,13-15].

استفاده از تنش های کششی موضعی در راستای نورد با تغییر انرژی مگنتواستاتیک، اندازه حوزه های مغناطیسی ۱۸۰ درجه را کاهش می دهد. بنابراین، این تنش های کششی منجر به کاهش تلفات جریان‌های گردابی غیرعادی در ورق ها می شوند [14-17]. با این حال، اگر مقدار تنش کششی موضعی از محدوده بهینه آن افزایش یابد، حرکت دیواره های مغناطیسی را در حین مغناطیس شدن تناوبی دشوار می کند. بنابراین، می تواند منجر به افزایش تلفات هیسترزیس ورق‌ها شود [14,18,19]. بر این اساس، کنترل پارامترهای فرایند لیزر ورق های فولاد سیلیکونی نظیر انرژی پرتوهای تابشی، فاصله بین خطوط لیزر، ابعاد نقاط تابش شده روی سطح و ... برای دستیابی به بهترین خواص مغناطیسی بسیار مهم است.

در فرایند تابش لیزر، پرتوهایی از لیزرهای پالسی یا پیوسته بصورت خطوطی در راستای عمود بر جهت نورد (جهت ایجاد تنش‌های کششی در راستای نورد ورق‌ها و اصلاح حوزه های ۱۸۰ درجه)و به فواصل تقریبی ۱۰-۱ میلیمتر از یکدیگر متناسب با انرژی پرتو لیزر مورد استفاده، روی سطح ورق‌ها تابیده می شود. با این عملیات، عرض دامین‌های مغناطیسی تا حد مناسبی کاهش یافته و در نتیجه از تلفات مغناطیسی ورق‌ها نیز کاسته می شود [14,15]. هرگونه تغییر در ابعاد نقاط پرتو لیزر، طول موج، متوسط انرژی در هر پالس (در لیزر پالسی)، مقدار انرژی در طول (در لیزر پیوسته)، کیفیت پرتو لیزر و سایر خصوصیات پرتو لیزر در تغییر تلفات مغناطیسی (هسته) ورق‌ها اهمیت زیادی دارد و لذا بهینه سازی هر کدام از متغیرهای دستگاهی و فرایندی برای دسترسی به خواص بهینه بسیار ضروری است.

اگرچه تحقیقات نسبتا گسترده ای در مورد کاربرد انواع لیزر و بهینه سازی متغیرهای فرایند لیزر متداول برای کاهش تلفات هسته ورق های فولادی سیلیکونی جهت دار انجام پذیرفته است [13-15] و [20-22] و همچنین به تازگی جهانگیری و همکاران تحقیقی در زمینه اثرات تابش لیزر دو طرفه بر روی ساختار حوزه های مغناطیسی و تلفات انرژی ورق‌های فولاد سیلیکونی انجام داده اند [23]، اما تا آنجا که نویسندگان مقاله حاضر می دانند تاکنون هیچ تحقیق سیستماتیکی در خصوص تاثیر انقطاع خطوط لیزر تابیده شده روی سطح ورق‌ها بر روی ساختار دامین‌ها و همچنین تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی انجام نپذیرفته است. از آنجایی که انقطاع خطوط لیزر، بدلیل عدم حکاکی بخش‌هایی از سطح ورق‌ها می تواند باعث آسیب دیدگی کمتر پوشش سطحی آنها گردد، در صورت کاهش قابل ملاحظه تلفات هسته این ورق‌ها، پتانسیل مطلوبی جهت کاربرد و عملیاتی شدن خواهد داشت. علاوه بر موضوع انقطاع خطوط لیزر در حین حکاکی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت دار، استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی در حین اعمال لیزر متقاطع روی سطح ورق‌ها نیز یکی دیگر از نوآوری‌های مورد نظر در این تحقیق بوده است. تحقیقات مختلف [25, 24] نشان داده است که اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی، می تواند با ایجاد تنش‌های کششی یا فشاری در جهات مختلف ورق‌ها، ساختار دامین‌های آنرا تغییر دهد. بنابراین این احتمال می رود که با استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی در حین فرایند لیزر متقاطع، ساختار نهایی حوزه ها پس از فرایند لیزر نسبت به شرایط بدون میدان مغناطیسی متفاوت باشد و لذا خواص مغناطیسی ورق‌های نهایی نیز متفاوت باشد.

با توجه به این شرایط و اهمیت بررسی تاثیر الگوهای تابش لیزر منقطع روی خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت دار، بخصوص در شرایطی که ورق ها در حین تابش لیزر تحت یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گرفته باشند، نتایج تحقیق حاضر می تواند دانش موجود در این زمینه را افزایش داده و امکان بیشتری را برای بهبود خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد الکتریکی فراهم نماید.

روش تحقیق

ورق فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع ورق‌های جهت‌دار با نفوذپذیری بالا (گرید M110-30P مطابق با استاندارد EN10107-2014) بود. در این تحقیق از ورق‌هایی به ضخامت ۰/۳ mm و با ابعاد ۳۰cm در۳ cm (بعد بزرگتر در جهت نورد ورق) استفاده شده‌است. این ورق‌ها که دارای یک پوشش سطحی دولایه بودند، از شرکت ایران ترانسفو ری تهیه شدند. این شرکت ورق‌های خود را از شرکت روسی سازنده ورق‌های

فولاد سیلیکونی با نام NLMK تهیه و خریداری کرده بود. شکل (۱) تصویر این ورق‌ها را نشان می‌دهد.

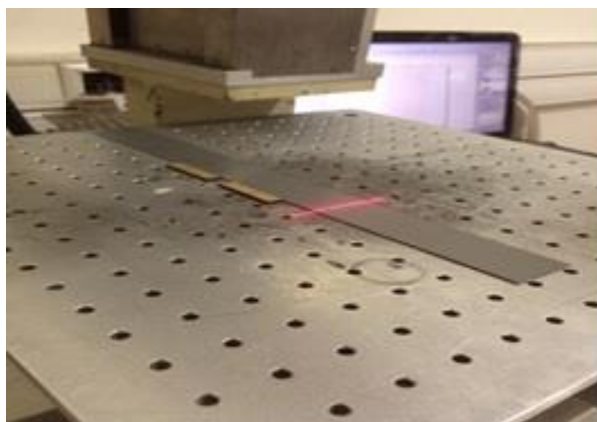


شکل ۱ تصویر ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر

جهت تعیین ترکیب شیمیایی ورق‌ها، یکی از نمونه‌ها پس از حذف پوشش، تحت آزمون آنالیز عنصری به روش اسپکتروسکوپی نوری قرار گرفت. به منظور مشاهده دانه‌بندی، ابتدا یک نمونه از یکی از ورق‌ها به ابعاد مناسب برش داده شد و سپس توسط سنباده ۸۰ پوشش‌زدایی شده و بدنبال آن با استفاده از سنبادهای ۱۲۰ تا ۱۲۰۰ آماده سازی شد. پس از آن ابتدا در محلول $5ml(HF)+80ml(H_2O_2)+15ml(H_2O)$ به مدت ٦٠ ثانیه پولیش شیمیایی شد تا سطح آن تمیز و براق گردد و پس از آن در محلول $20\%H_3PO_4+4\%H_2O_2+1\%HF+75\%H_2O$ به مدت ۱۵ ثانیه اچ گردید.

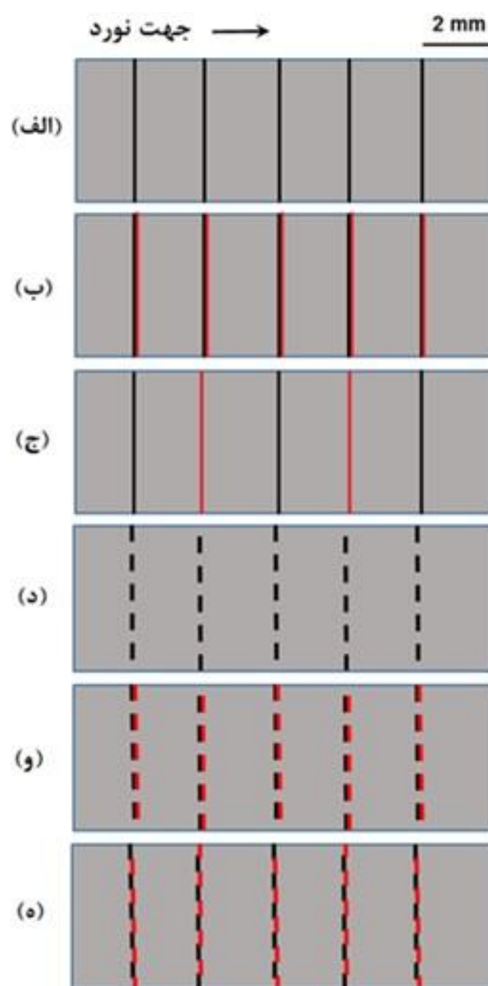
برای تابش لیزر از لیزر پالسی فایبر با قدرت حداکثر ۲۰ وات، طول موج ۱۰٦٤ نانومتر با نقطه اثری به اندازه ۵۰ میکرومتر و فرکانس کاری ۲۰ کیلوهرتز (۲۰۰۰۰ پالس بر ثانیه) استفاده شد. شکل (۲) تصویری از دستگاه لیزر مورد استفاده را در حین تابش لیزر روی سطح یکی از ورق‌های فولاد سیلیکونی نشان می‌دهد. همچنین تعدادی از ورق‌ها در حین تابش لیزر با الگوهای مختلف، تحت یک میدان مغناطیسی خارجی با شدت اعمال ۰/۷ تسلا در راستای طول ورق‌ها واقع شدند. روند و تجهیزات مورد استفاده در این عملیات در مرجع [23] ذکر شده است.

برای اندازه گیری تلفات مغناطیسی، از دستگاه آزمون تک ورق استفاده شد. اندازه گیری تلفات هسته ورق‌ها در یک دستگاه Soken DAC-BHW-2 صورت پذیرفت. آزمایشات اندازه گیری تلفات هسته در چگالی شار مغناطیسی ۱/۷ تسلا و فرکانس ۵۰ هرتز انجام شد. اگر تلفات مغناطیسی را قبل از تابش لیزر روی سطح ورق‌ها با P0 و تلفات مغناطیسی را پس از استفاده از لیزر با P1 نمایش دهیم، میزان کاهش تلفات هسته با فرمول $\eta = (P0- P1) / P0$ نشان داده می شود.



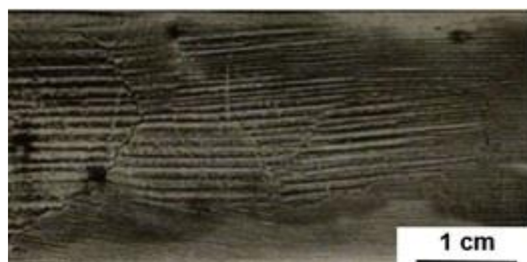
شکل ۲ دستگاه لیزر فایبر مورد استفاده در تحقیق حاضر در حین فرآیند اعمال لیزر روی سطح ورق‌ها

در این تحقیق برای بهینه سازی پارامترهای "فرایند متداول" تابش لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی، آزمایشهای مقدماتی صورت پذیرفت. منظور از فرایند متداول تابش لیزر، تابش پرتوهای لیزر بر روی یک طرف ورق‌ها بصورت خطوط ساده، موازی و پیوسته (غیر منقطع) در راستای عمود بر جهت نورد ورق‌ها است. با توجه به ارائه نتایج این آزمایشهای مقدماتی در مرجع [23]، از ذکر مجدد آنها صرف نظر می شود و نتایج بدست آمده تنها جهت مقایسه با نتایج کار حاضر بیان خواهند شد. پس از بهینه سازی پارامترهای فرایند متداول لیزر، تأثیر الگوهای مختلف انقطاع و پیوسته خطوط لیزر با و بدون اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی، بر تلفات هسته و ساختار حوزه های مغناطیسی ورق های فولادی مورد بررسی قرار گرفت. شماتیک الگوهای مختلف فرایند تابش لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۳ شماتیک الگوهای مختلف لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی، خطوط مشکی نشاندهنده تابش لیزر روی سطح فوقانی و خطوط قرمز نمایانگر تابش لیزر روی سطح زیرین است. لازم به ذکر است که فاصله بین انقطاع ها، جزء متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق بوده و لذا لزوما در کلیه الگوها، یکسان نبوده است.

برای بررسی و تعیین ساختار حوزه های مغناطیسی سطحی ورق ها بدون برداشتن پوشش آنها از روش پودر مغناطیسی (روش بیتر) استفاده شد. در این روش، ذرات مغناطیسی بسیار ریز که در جوهر مغناطیسی معلق هستند (سوسپانسیون کلوئیدی مغناطیسی) به دلیل نشت شار مغناطیسی از دیواره حوزه های مغناطیسی، در این مناطق جذب شده و کنتراست لازم را جهت مشاهده حوزه ها ایجاد می نمایند. بنابراین، ساختار حوزه ها بر روی کل سطح ورق ها مشاهده شد (شکل ٤)، و تصاویر لازم با یک میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی های دلخواه به دست آمد. به منظور برآورد اندازه حوزه های مغناطیسی، عرض حداقل ۱۰ حوزه در دانه های مختلف هر ورق اندازه گیری شد و میانگین این اندازه گیری ها محاسبه و گزارش شد.



شکل ٤ نمایی از سطح ورق فولاد سیلیکونی پس از اعمال سوسپانسیون و ظهور حوزه های مغناطیسی برای اندازه گیری متوسط عرض آن

نتایج و بحث

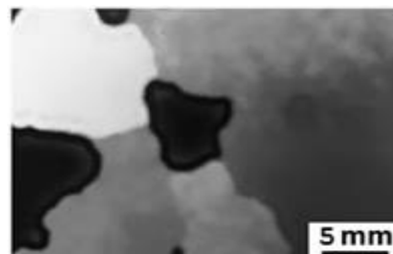
جدول (۱) ترکیب شیمیایی ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. همانگونه که در این جدول مشخص است سیلیسیم عنصر آلیاژی اصلی موجود در ترکیب شیمیایی فولاد مورد نظر می باشد و مقدار آن ۳/۲۵ درصد وزنی است. در این ورق‌ها میزان کربن باید در حد خیلی پایین باشد تا خواص مغناطیسی و مخصوصاً نفوذپذیری مغناطیسی و تلفات هسته با گذر زمان تخریب نگردد. بر طبق مرجع [26] علت اصلی افت خواص مغناطیسی با گذر زمان، نفوذ و تجمع اتم‌های کربن به گونه‌ای است که منجر به سخت شدن حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی می شود.

شکل (۵) بخشی از ساختار اچ شده ورق‌های مورد نظر را نشان می‌دهد. در این ساختار، دانه‌های کوچک‌تر ابعادی در حدود ۱–۵ میلی‌متر داشته و دانه‌های درشت‌تر که قسمت اعظم ساختار را تشکیل می‌دهند بسیار بزرگ بوده و ابعاد برخی از آن‌ها به ۲ سانتی‌متر می‌رسد. ریزساختار بطور کامل فریتی است.

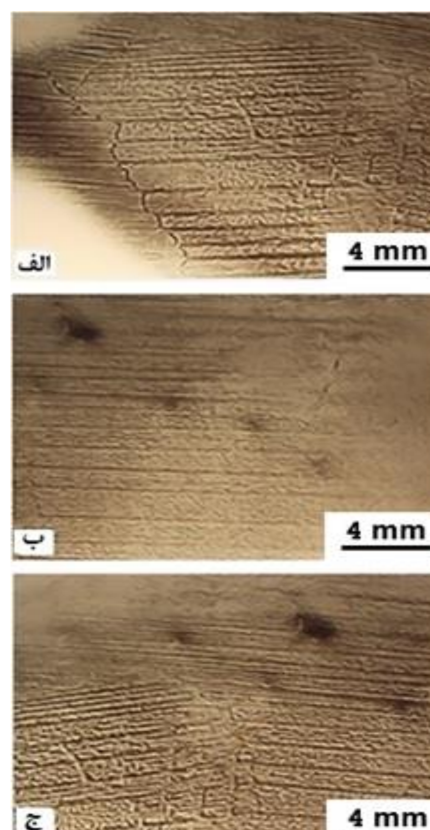
شکل (٦) تصویر حوزه‌های مغناطیسی در ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد بررسی در تحقیق حاضر را نمایش می دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود حوزه‌های مغناطیسی در دانه‌های مختلف به حالت درشت و ریز موجود بوده و با زاویه کمی از جهت نورد قرار گرفته‌اند. عرض این حوزه‌ها به موارد مختلفی از جمله شرایط تنشی و میزان انحراف از بافت گوسی (چه به صورت جهتی و چه به صورت صفحه ای) بستگی دارد. متوسط ابعاد حوزه ها در این ورق‌ها در حدود ۰/۹ میلیمتر بدست آمد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر (بر حسب درصد وزنی)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
Base	<0.001	3.25	0.0957	0.0258	0.00020	0.131
Ni	Mo	Al	Co	Cu	Nb	Ti
0.0118	0.0084	0.0083	0.0018	0.0057	0.0067	<0.00020
V	W	Pb	Sn	Ca	Ta	B
0.0014	0.0013	0.0033	0.0731	0.001	0.0057	0.0011



شکل ۵ ساختار و دانه‌بندی ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد استفاده در تحقیق حاضر



شکل ٦ حوزه‌های مغناطیسی در بخش‌های مختلف ورق‌های فولاد سیلیکونی که با استفاده از روش بیتر آشکار شده‌اند. شکل‌های (الف، ب و ج) از بخش‌های مختلف سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی قبل از اعمال لیزر بدست آمده اند

آزمایش‌های انجام شده در مراحل مقدماتی (تابش لیزر روی یک طرف سطوح ورق‌ها به‌صورت خطوط پیوسته (نامنقطع) با انرژی تابشی، سرعت لیزرینگ و فواصل گوناگون) نشان داد که با بهینه سازی پارامترهای لیزرینگ همراه با کنترل فواصل بین خطوط لیزر می توان تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی انتخابی را به میزان ۹/۷ درصد کاهش داد [23]. این آزمایش‌های اولیه که مشابه فعالیت‌های انجام شده در مراجع مختلف بود، نتایج مشابهی نیز ارائه نمود و همان محدوده کاهش ۱۰–۸ درصدی در تلفات توان را ایجاد نمود [8,10] و [15-13] و -20] [22. تفاوت شرایط انتخابی در آزمایش‌های انجام شده به روش متداول در تحقیق حاضر با آزمایش‌ها و نتایج دیگر تحقیقات منتشر شده در این زمینه آن بود که در تحقیق حاضر از همان ابتدا، مقدار انرژی به ازاء هر پالس لیزر کمتر از محدوده های پیشنهادی در مراجع مختلف انتخاب شد که این امر به دو دلیل صورت پذیرفت. دلیل اول لزوم کاهش انرژی انتقالی به سطح ورق‌های پوشش دار است تا بتوان حداقل آسیب را به پوشش سطحی ورق‌ها وارد نمود. بدیهی است که با کاهش انرژی جذب شده روی سطح ورق‌ها، میزان افزایش دمای موضعی، ذوب و تبخیر سطحی آلیاژ و پوشش کاهش یافته و از این نظر مزایای بیشتری حاصل می شود. اگرچه در مراجع مختلف از انرژی‌های بالاتر برای حکاکی لیزر ورق‌های فولاد سیلیکونی استفاده شده است، اما برای اطمینان از عایق بودن الکتریکی سطوح ورق‌ها نسبت به یکدیگر، اعمال پوشش‌های ثانوی روی سطح ورق‌ها پس از تابش لیزر الزامی بوده است که این موضوع منجر به افزایش هزینه ها نیز گردیده است. دلیل دوم نیز محدودیت توان دستگاه انتخابی بود که امکان ایجاد انرژی‌های بیشتر در هر پالس را فراهم ننمود.

با توجه به نتایج اخذ شده از آزمایش‌های متداول و آگاهی از اینکه استفاده از انرژی‌های بیشتر روی سطوح ورقها (تا حدی که منجر به ایجاد عیب در ساختار و افزایش تلفات هیسترزیس نگردد) می تواند منجر به ایجاد تنش‌های کششی بیشتر روی سطح و کاهش احتمالی بیشتر در تلفات هسته ورق‌های سیلیکونی گردد، تصمیم گرفته شد تا بجای اعمال لیزر روی یک طرف ورق، این عملیات روی دو طرف سطح ورقها اعمال گردد. بعبارت دیگر افزایش انرژی جذب شده از طریق اعمال لیزر به دو طرف سطح ورقها تامین گردد تا بدینوسیله ضمن آسیب رساندن کمتر به پوشش سطحی، امکان کاهش تلفات بیشتری نیز فراهم گردد. نتایج این طرح دو طرفه تابش لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی که در مقالات منتشر شده از سوی نویسندگان مقاله حاضر چاپ شده است [23]، نشان داد که دوطرفه اعمال کردن لیزر می تواند باعث بهبود خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد سیلیکونی گردد. اعمال لیزر روی هر دو طرف (دو سطح) ورق‌های فولاد سیلیکونی توانسته است منجر به ایجاد تنشهای کششی بیشتر و در نتیجه کاهش بیشتر تلفات هسته ورقها گردد. این امر بخصوص هنگامی مشهود است که خطوط لیزر اعمالی روی یک طرف ورقها دقیقا روی سطح طرف مقابل منطبق گردد. در چنین شرایطی تلفات هسته نسبت به حالت یک طرفه اعمال کردن لیزر در حدود ٤۰ درصد کاهش می یابد. بنابراین به نظر می رسد که اعمال لیزر روی دو طرف ورق‌های فولاد سیلیکونی تا حدودی خاصیت جمع پذیری داشته باشد. همانگونه که پیشتر ذکر شد این نکته از آن جهت ارزش فراوانی دارد که می تواند باعث شود با تقسیم انرژی لیزر تابشی روی دو طرف ورق، آسیب کمتری را به پوشش سطحی ورقها وارد نمود. نتایج این دو نوع آزمایش (روش متداول و همچنین روش دوطرفه لیزر کردن ورق‌های فولاد سیلیکونی) در ردیفهای اول تا سوم جدول (۲) ارائه شده است.

نتیجه مهم دیگری که از انجام آزمایش‌های این تحقیق بدست آمد تاثیر انقطاع خطوط لیزر در حالت اعمال یک طرفه لیزر و یا اعمال دوطرفه آنها است. تاکنون در هیچ مدرکی، به اثر انقطاع خطوط لیزر یا پیوستگی آنها روی خواص مغناطیسی ورق‌های فولاد سیلیکونی اشاره ای نشده است. بنابراین، این سوال مطرح است که هنگامیکه لیزر بصورت منقطع روی یک طرف یا دو طرف ورقها اعمال می گردد، آیا طول انقطاع خطوط لیزر روی سطح، اثری بر میزان تنشهای کششی باقیمانده و در نتیجه خواص مغناطیسی ورقها خواهد داشت؟ و آیا همپوشانی خطوط منقطع لیزر روی دو طرف ورقها اثر بیشتری بر جای خواهد گذاشت یا غیر همپوشانی آنها؟

با توجه به این ایده، در ابتدا آزمایش‌ها بگونه‌ای طراحی و اجرا شد که خطوط منقطع لیزر با فواصل انقطاع متفاوت (از ۲ تا ۱۰ میلیمتر) تنها روی یک طرف ورقها اعمال گردند. نتایج این سری از آزمایش‌ها در ردیف‌های ٤ الی ۸ جدول (۲) ارائه شده اند. سپس، آزمایش‌های دیگر بگونه ای صورت پذیرفت که خطوط منقطع لیزر روی یک طرف ورق‌ها، محل انقطاع و ناپیوستگی سمت دیگر ورقها را بپوشانند. نتایج این آزمایش‌ها در ردیفهای ۹ الی ۱۱ جدول (۲) ارائه شده است. بالاخره، آزمایشهایی طراحی شد که خطوط لیزر تابشی بصورت منقطع روی دو طرف سطوح ورقها بطور دقیق روی هم منطبق گردند. نتایج این سری از آزمایش‌ها نیز در ردیف‌های ۱۲ الی ١٤ جدول (۲) گزارش شده اند.

نتایج آزمایش‌ها نشان می دهد که در اثر انقطاع خطوط لیزر تابشی روی یک سمت ورق‌ها، اگرچه در طول‌های انقطاع کوچک نظیر ۲ میلیمتر، تاثیر فرایند لیزر روی کاهش تلفات ورق‌های فولاد سیلیکونی ناچیز است، اما با افزایش طول انقطاع به حدود ٦ میلیمتر، تلفات ورقها تا حد زیادی کاهش می یابد (شکل ۷)، و سپس با افزایش مجدد طول انقطاع تا حدود ۱۰ میلیمتر، دوباره اثر مثبت لیزرینگ در کاهش تلفات کمتر می شود. چنین شرایطی برای تابش دوطرفه لیزر روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد نظر نیز صادق است. توجیه این تغییرات در حال حاضر دشوار می نماید اما با توجه به اینکه مکانیزم اصلی کاهش تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی جهت دار در اثر حکاکی سطح آنها با اشعه لیزر به ایجاد تنشهای کششی کنترل شده در راستای نورد ورقها و کاهش عرض دامینهای اصلی ۱۸۰ درجه مربوط می شود، می توان پیش بینی نمود که طول انقطاع ٦ میلیمتر، مناسب ترین شرایط تنشی را در سطح ورقها برای کاهش اندازه دامینهای مغناطیسی و در نتیجه کاهش تلفات این

ورق‌ها ایجاد نموده باشد.

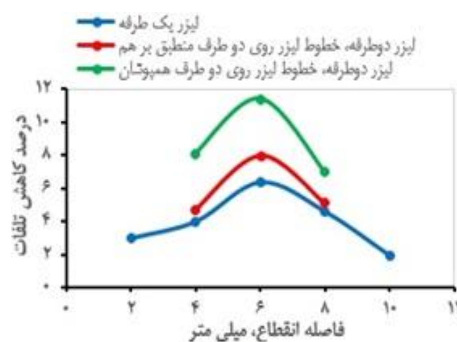
تاثیر طول انقطاع خطوط لیزر بر ساختار حوزه‌های مغناطیسی در شکل (۸) نشان داده شده‌است. این شکل نشان می دهد که در شرایطی که طول انقطاع خطوط لیزر ۲ میلی‌متر باشد (شکل ۸-الف)، حوزهای مغناطیسی موجود در حدفاصل ٤ میلی‌متری بین دو خط مشابه به هیچ عنوان ریز نشده اند. با افزایش طول انقطاع به ٤ و ٦ میلی متر، نتایج بهتری حاصل شده و شرایط در حالتی که طول انقطاع برابر ٦ میلی‌متر باشد (شکل ۸-ج)، کمابیش در حالت بهینه قرار دارد.

جدول ۲ تأثیر الگوهای انقطاع خطوط لیزر و نیز یکطرفه/دوطرفه اعمال کردن لیزر روی تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی، توضیحات مربوط به هر نمونه (الگو) در زیر جدول ارائه شده است

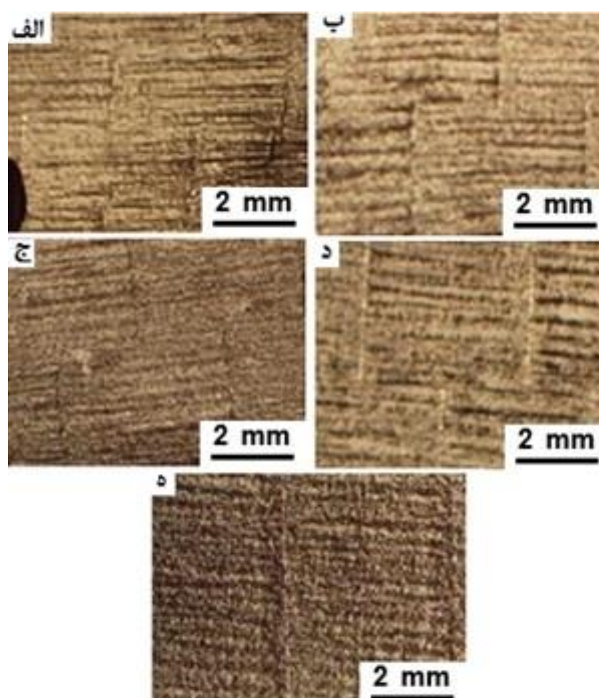
شماره نمونه	تلفات قبل از لیزر (W/Kg)	تلفات بعد از لیزر (W/Kg)	تغییرات تلفات (٪)
۱	۱/۰۳	۰/۹۳	۹/۷
۲	۱/۰۳	۰/۹۱	۱۱/٦
۳	۰/۹۵	۰/۸۲	۱۳/۷
٤	۱/۰۱	۰/۹۸	۲/۹۷
۵	۱	۰/۹٦	٤
٦	۱/۱	۱/۰۳	٦/٤
۷	۱/۰۸	۱/۰۳	٤/٦
۸	۱/۰۱	۰/۹۹	۱/۹
۹	۰/۹۹	۰/۹۱	۸/۱
۱۰	۱/۰۵	۰/۹۳	۱۱/٤
۱۱	۱	۰/۹۳	۷
۱۲	۱/۰۷	۱/۰۲	٤/۷
۱۳	۱/۱۲	۱/۰۳	۸
۱٤	۰/۹۸	۰/۹۳	۵/۱

شرایط نمونه شماره ۱: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
شرایط نمونه شماره ۲: فاصله خطوط لیزر ٤ میلیمتر، خطوط لیزر پیوسته (غیرمنقطع)، اعمال لیزر روی هر دو طرف ورق، خطوط پشت و رو غیرمنطبق
شرایط نمونه شماره ۳: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی هر دو طرف ورق، خطوط پشت و رو منطبق بر هم
شرایط نمونه شماره ٤: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۲ میلیمتر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
شرایط نمونه شماره ۵: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٤ میلیمتر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
شرایط نمونه شماره ٦: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٦ میلیمتر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
شرایط نمونه شماره ۷: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۸ میلیمتر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
شرایط نمونه شماره ۸: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۱۰ میلیمتر)، اعمال لیزر روی یک طرف ورق
شرایط نمونه شماره ۹: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٤ میلیمتر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو غیرمنطبق بر هم
شرایط نمونه شماره ۱۰: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٦ میلیمتر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو غیرمنطبق بر هم
شرایط نمونه شماره ۱۱: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۸ میلیمتر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو غیرمنطبق بر هم
شرایط نمونه شماره ۱۲: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٤ میلیمتر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو منطبق بر هم
شرایط نمونه شماره ۱۳: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٦ میلیمتر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو منطبق بر هم
شرایط نمونه شماره ۱٤: فاصله خطوط لیزر ۲ میلیمتر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ۸ میلیمتر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف (پشت و رو)، خطوط پشت و رو منطبق بر هم

جدول ۲ تاثیر الگوهای انقطاع خطوط لیزر و نیز یکطرفه/دوطرفه اعمال کردن لیزر روی تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی، توضیحات مربوط به هر نمونه (الگو) در زیر جدول ارائه شده است

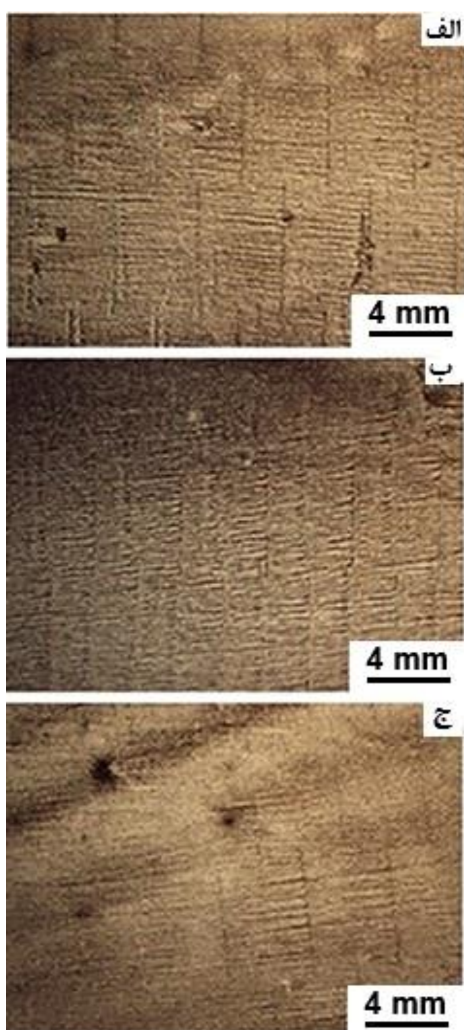


شکل ۷ تاثیر طول (فواصل) انقطاع لیزر روی کاهش تلفات ورق‌های فولاد سیلیکونی، توان دستگاه لیزر ۲۰ W، فرکانس تابش: ۲۰ kHz، سرعت خطی لیزر ۱۵۰۰ mm/s



شکل ۸ تاثیر طول انقطاع بر ساختار حوزه‌های مغناطیسی در شرایطی که لیزر تنها روی یک طرف ورق‌های فولاد سیلیکونی تابیده شود. طول انقطاع برابر با: الف) ۲ میلی‌متر، ب) ٤ میلی‌متر، ج) ٦ میلی‌متر، د) ۸ میلی‌متر و ه) ۱۰ میلی‌متر

نتایج تحقیق حاضر همچنین نشان می دهد هنگامیکه خطوط لیزر بصورت منقطع و با طول انقطاع ٦ میلیمتر روی دو طرف سطوح ورق‌ها بگونه ای تابیده شوند که خطوط لیزر روی یک طرف، بخش تابیده نشده از سمت دیگر را بپوشاند (نمونه شماره ۱۰)، تحت این شرایط، کاهش تلفات ورق‌های فولاد سیلیکونی بسیار چشمگیرتر و نزدیک به شرایط اعمال لیزر پیوسته روی دو طرف ورق (نمونه شماره ۳) بدست می آید. به نظر می رسد که این شرایط منجر به بهینه شدن انرژی جذب شده روی سطح ورق‌های مورد نظر و ایجاد مناسب ترین شرایط برای ایجاد تنشهای کششی مطلوب جهت کاهش عرض حوزه های مغناطیسی گردیده است. اثر الگوی انقطاع ٦ میلی‌متری در حالت تک‌رو و دورو با طرح منطبق و غیرمنطبق (مکمل و همپوشان) در شکل (۹) نشان داده شده‌است.



شکل ۹ تاثیر طرح خطوط منقطع لیزر اعمال شده بر ساختار حوزه‌های مغناطیسی؛ (الف) طرح خطوط منقطع پشت و رو منطبق بر هم، (ب) طرح خطوط منقطع پشت و رو مکمل هم (همپوشان)، (ج) طرح خطوط منقطع یک طرفه. در کلیه این نمونه ها طول انقطاع ٦ میلیمتر بوده است

همان‌گونه که در شکل (۹) دیده می‌شود در تصاویر (الف و ب) با توجه به این‌که انرژی بیشتری به سطح ورق وارد شده، ریزشدگی حوزه‌های مغناطیسی به میزان بیشتری اتفاق افتاده است. نکته قابل توجه دیگر در این شکل آن است که در حالتی که خطوط لیزر منقطع در پشت و روی ورق‌ها مکمل یکدیگر باشند و بطورکامل فاصله انقطاع یکدیگر را در سطح مقابل بپوشانند (نظیر طرح ه در شکل ۳)، ریزشدگی بیشتری در دامین ها صورت می گیرد که با نتایج آزمایش تست تلفات مغناطیسی ورق‌ها نیز تطابق دارد. به عبارت دیگر این شکل نشان می‌دهد که توزیع تنش‌های کششی که لیزر منقطع دو طرفه حالت مکمل در سطح ورق‌ها ایجاد می کند، به مراتب مطلوبتر از توزیع تنش‌های جمع شونده ای است که خطوط لیزر منقطع دوطرفه منطبق بر هم (نظیر طرح و در شکل ۳) ایجاد می کنند و الگوی مکمل دوطرفه منجر به ریز شدن بیشتر حوزه‌های مغناطیسی می‌شود.

بر اساس نتایج آزمایش‌های فوق، نمونه های بهینه انتخاب گردید و تاثیر استفاده همزمان از یک میدان مغناطیسی طولی خارجی در حین تابش لیزر روی سطح این ورق‌ها بررسی شد. جدول (۳) نتایج به دست آمده از آزمایش تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی لیزر شده تحت میدان مغناطیسی طولی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می شود استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی در راستای طول ورق‌ها (جهت نورد ورق‌ها) در حین لیزر کردن سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی منجر به بهبود قابل ملاحظه در خواص مغناطیسی ورق‌ها شده است، بگونه ای که حتی در شرایط انقطاع خطوط لیزر نیز، استفاده از میدان مغناطیسی خارجی باعث کاهش تلفاتی در حد نمونه های با خطوط لیزر دو طرفه و پیوسته شده است (مقایسه نمونه های ۱۷ و ۱۹). دلیل این موضوع می تواند تاثیر مثبت میدان مغناطیسی خارجی در ایجاد تنشهای کششی در سطح ورق‌ها و در نتیجه تغییر قابل ملاحظه در عرض دامینهای مغناطیسی باشد [27-29] که پس از تابش لیزر؛ چه بصورت منقطع و چه بصورت پیوسته؛ منجر به کاهش مطلوب اندازه حوزه های مغناطیسی و در نتیجه کاهش فراوان در تلفات هسته ورق‌ها گردد.

جدول ۳ تاثیر انقطاع خطوط لیزر یکطرفه/دوطرفه در حضور میدان مغناطیسی خارجی ۰/۷ تسلا بر روی تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی. توضیحات مربوط به هر نمونه در زیر جدول ارائه شده است

شماره نمونه	تلفات قبل از لیزر (W/Kg)	تلفات بعد از لیزر (W/Kg)	تغییرات تلفات (٪)
۱۵	۱/۱۲	۰/۹۷	۱۳/٤
١٦	۱/۱۵	۱/۰۳	۱۰/٤
۱۷	۱/۰۷	۰/۸۹	١٦/۸
۱۸	۰/۸۹	۰/۷۷	۱۳/۵
۱۹	۱/۰۱	۰/۸۵	۱۵/۹

شرایط نمونه شماره ۱۵: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی یک طرف

شرایط نمونه شماره ١٦: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٦ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی یک طرف

شرایط نمونه شماره ۱۷: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر پیوسته (غیر منقطع)، اعمال لیزر روی دو طرف و منطبق

شرایط نمونه شماره ۱۸: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٦ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف و منطبق (پشت و رو)

شرایط نمونه شماره ۱۹: فاصله خطوط لیزر ۲ میلی‌متر، خطوط لیزر منقطع (طول انقطاع ٦ میلی‌متر)، اعمال لیزر روی هر دو طرف و غیرمنطبق (مکمل یا همپوشان)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تاثیر الگوهای مختلف انقطاع خطوط لیزر تابشی در حضور/عدم حضور یک میدان مغناطیسی خارجی روی ساختار حوزه های مغناطیسی و تلفات هسته ورق‌های فولاد سیلیکونی مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱. هنگامیکه طول انقطاع خطوط لیزر منقطع روی سطح ورق‌های فولاد سیلیکونی در حدود ٦ میلی متر انتخاب گردد، خواص مغناطیسی مناسب تری برای ورق‌های مورد نظر بدست می آید.

۲. در طول انقطاع بهینه، اگر خطوط لیزر منقطع روی دو طرف ورق‌ها بگونه ای تابیده شوند که خطوط لیزر روی یک طرف، بخش تابیده نشده از سمت دیگر را بپوشاند، تلفات ورق‌های فولاد سیلیکونی بسیار کاهش یافته و مشابه شرایط اعمال لیزر

پیوسته روی دو طرف سطح ورق‌ها می شود.

۳. استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی در راستای نورد ورق‌های فولاد سیلیکونی در حین لیزر کردن دوطرفه و ناپیوسته سطح آنها بگونه ای که طول انقطاع در حدود ٦ میلیمتر باشد، باعث بیشترین میزان کاهش در تلفات هسته و بهبود قابل ملاحظه خواص مغناطیسی آنها می شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از پژوهشگاه نیرو بدلیل حمایت مالی از این تحقیق و همچنین شرکت ایران ترانسفوری بدلیل کمک در تهیه مواد اولیه مورد نیاز جهت این پژوهش قدردانی و تشکر می نمایند

مراجع

1. Cullity, B. D., and Graham, C. D., "Introduction to Magnetic Materials", Wiley-IEEE Press, Hoboken, New Jersey, pp. 1-21, (2008).
2. Krishnan, K.M., "Fundamentals and Applications of Magnetic Materials", First Edition, Oxford University Press, Oxford, (2016).
3. Soinski, M. and Moses, A.J., "Anisotropy in Iron-Based Soft Magnetic Materials", Handbook of Magnetic Materials (Chapter 4), Vol. 8, Elsevier Science B. V, pp. 325-414, (1995).
4. Sankara Subramanian, A.T., Meenalochini, P., Suba Bala Sathiya, S. and Ram Prakash, G., "A review on selection of soft magnetic materials for industrial drives", *Materials Today Proceedings,* Vol. 45, pp. 1591-1596, (2021).
5. Krings, A., Boglietti, A., Cavagnino, A. and Sprague, S., "Soft magnetic material status and trends in electric machines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* Vol. 64, pp. 2405-2414, (2017).
6. Herzer, G., "Modern soft magnets: amorphous and nanocrystalline materials", *Acta Materialia,* Vol. 61, pp. 718-734, (2013).
7. Song, H., Liu, H., Wang, Y. and Wang, G., "Microstructure and texture evolution of ultra-thin grain-oriented silicon steel sheet fabricated using strip casting and three-stage cold rolling method", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 426, pp. 32-39, (2017).
8. Imafuku, M., Suzuki, H., Akita, K., Iwata, K. and Fujikura, M., "Effects of laser irradiation on iron loss reduction for Fe–3%Si grain-oriented silicon steel", *Acta Materialia,* Vol. 53, No. 4, pp. 939-945, (2005).
9. Sato, K., Honda, A., Nakano, K., Ishida, M., Fukuda, B. and Kan, T., "Development of domain refined grain-oriented silicon steel by grooving", *Journal of Applied Physics,* Vol. 73, No. 10, 6609, (1993).
10. Iuchi, T., Yamaguchi, S. and Ichiyama, T., "Laser processing for reducing core loss of grain oriented silicon steel", *Journal of Applied Physics,* Vol. 53, No. 3, 2410, (1982).
11. Inokuti, Y., "Grain oriented silicon steel sheet with a ceramic film characterized by ultra-low iron loss", *Vacuum,* Vol. 47, No. 6–8, pp. 857-862, (1996).
12. Zhang Y., Gu H., Yang S. and Huang A., "Improved magnetic properties of grain-oriented silicon steel by in-situ formation of potassium zirconium phosphate in insulating coating", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 506, 166802, (2020).
13. Li J., Gu Y. and Guo Z., "Decreasing the core loss of grain-oriented silicon steel by laser processing", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 69, No. 1–3, pp. 180-185, (1997).

14. Patri, S., Gurusamy, R., Molian, P. A. and Govindaraju, M., "Magnetic domain refinement of silicon-steel laminations by laser scribing", *Journal of Materials Science,* Vol. 31, pp. 1693-1702, (1996).

15. Nesser, M., Maloberti, O., Dupuy, J., Salloum, E., Panier, S., Fortin, J. and Dassonvalle, P., "Correlation between laser energetic parameters and magnetic properties of GO laminations under surface treatments with long, short or ultra-short pulsed lasers", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 504, 166696, (2020).

16. Takajo, S., Ito, T.; Omura, T. and Okabe, S., "Loss and noise analysis of transformer comprising grooved grain-oriented silicon steel", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 53, No. 9, 2001606, (2017).

17. Ouyang, G., Chen, X., Liang, Y., Macziewski, C. and Cui, J., "Review of Fe-6.5 wt%Si high silicon steel—A promising soft magnetic material for sub-kHz application", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 481, pp. 234-250, (2019).

18. Weidenfeller, B. and Riehemann, W. "Effects of surface treatments on the hysteresis losses of GO iron silicon steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 292, pp. 210-214, (2005).

19. Qiu, F., Ren, W., Tian, G. and Gao, B., "Characterization of applied tensile stress using domain wall dynamic behavior of grain-oriented electrical steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 432, pp. 250-259, (2017).

20. Petryshynets, I., Kovac, F., Puchy, V., Sebek, M., Fuzer, J. and Kollar, P., "Magnetic losses reduction in grain oriented silicon steel by pulse and continuous fiber laser processing", *AIP Advances*, Vol. 8, 047604, (2018).

21. Rauscher, P., Betz, B., Hauptmann, J., Wetzig, A., Beyer, E. and Grünzweig, C., "The influence of laser scribing on magnetic domain formation in grain oriented electrical steel visualized by directional neutron dark-field imaging", *Scientific Reports,* Vol. 6, Article number: 38307, (2016).

22. Cheng, L., Ma, G., Chen, X., Yang, F., Meng, L., Yang, Y., Li, G. and Dong, H., "Evolutions of microstructure and magnetic properties of heatproof domain-refined silicon steel during annealing and its application", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 514, 167264, (2020).

23. Jahangiri, M.R., Bayani, H., Ardestani, M. and Mehdizadeh, M., "Core loss reduction in grain-oriented silicon steel sheets by two-sided laser scribing in the presence of a magnetic field", *Journal of Alloys and Compounds,* Vol. 891, 162080, (2022).

24. Shilling, J. and Houze, G., "Magnetic properties and domain structure in grain-oriented 3% Si-Fe", *IEEE Transactions on Magnetics,* Vol. 10, No. 2, pp. 195-223, (1974).

25. Hubert, O. and Daniel, L., "Multiscale modeling of the magneto-mechanical behavior of grain-oriented silicon steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 320, No. 7, pp. 1412-1422, (2008).

26. De Campos, M.F., Emura, M. and Landgraf, F.J.G., "Consequences of magnetic aging for iron losses in electrical steels", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 304, No. 2, pp. e593-e595, (2006).

27. Houze, G. L. Jr., "Domain-wall motion in grain-oriented silicon steel in cyclic magnetic fields", *Journal of Applied Physics,* Vol. 38, No. 3, pp. 1089-1095, (1967).

28. Skorvanek, I., Marcin, J., Krenicky, T., Kovac, J., Svec, P. and Janickovic, D., "Improved soft magnetic behaviour in field-annealed nanocrystalline hitperm alloys", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 304, No. 2, pp.

203-207, (2006).

29. Perevertov, O., Thielsch, J. and Schafer, R., "Effect of applied tensile stress on the hysteresis curve and magnetic domain structure of grain-oriented transverse Fe-3%Si steel", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* Vol. 385, pp. 358-367, (2015).